УДК 621.181.12.662.73/.74.001.5

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ГОРЕНИЯ В ТОПКЕ КОТЛА БКЗ-420-140 ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ВАРИАНТАМ ЗАМЕЩЕНИЯ ПРОЕКТНОГО ТОПЛИВА

А.В. Гиль, А.С. Заворин, С.В. Красильников, С.В. Обухов, А.В. Старченко

Томский политехнический университет
E-mail: AG-83@mail.ru

Изложены результаты исследования топочных процессов в топке котла БКЗ-420-140 Омской ТЭЦ-4 при сжигании в ней проектного топлива (экибастузский уголь) и замещающих его углей (кузнецкий Д и ирша-бородинский) на основе математических моделей прикладного программного пакета FIRE 3D. Проведен анализ полученных результатов в трехмерной интерпретации применительно к каждому виду топлива, а также сравнения полученных данных с нормативными расчетами.

Введение

Отечественным котлостроением создан типоряд уникальных котельных агрегатов для сжигания каменного угля Экибастузского угольного месторождения. К ним относятся котельные агрегаты БКЗ-320-140 и БКЗ-420-140, ПК-39 для энергоблоков мощностью 300 МВт, П-57 энергоблоков 500 МВт, конструирование которых базировалось на таких свойствах угля как хорошая сыпучесть, взрывобезопасность, несмерзаемость, низкая влажность и умеренная теплота сгорания [1]. Однако этот уголь имеет специфичные и существенные недостатки: большую минеральную составляющую и значительную абразивность летучей золы.

Вследствие ужесточения в России экологических норм за выбросами загрязняющих веществ в окружающую среду существенно обострились негативные стороны энергетического сжигания экибастузского угля, что наряду с другими аспектами его использования поставило вопрос о замене экибастузского угля, сжигаемого на ТЭС России, отечественными углями.

Специфика выбора альтернативных экибастузскому углей состоит в том, что все известные угли России имеют менее тугоплавкую золу (более шлакующую) и, соответственно, котлы для них лимитированы другими параметрами конструирования топочного устройства [2]. Поэтому при замещении экибастузского угля

первоочередными вопросами являются анализ температурного уровня и условий шлакования экранированных стен топки котельного агрегата.

Принимая во внимание все вышеперечисленные факторы – экологического и экономического характера, в 1995–1996 гг. была разработана программа первоочередных работ по замещению экибастузского угля углями российских месторождений [3]. Проведенные опытные сжигания отсева хакасского угля марки ДСШ в смеси с экибастузским, а также кузнецкого угля марки СС были очень трудоемким, весьма дорогим и сложным в организационном плане мероприятием. Современный уровень математического моделирования физических процессов и развития специального программного обеспечения позволяет решать такие задачи менее затратным путем численного исследования, преимущества которого наиболее очевидны при необходимости отбора технических решений для конструкторской проработки из нескольких вариантов.

Объект и средства моделирования

Численный эксперимент проводился для котла типа Е-420-140, который предназначен для сжигания каменных углей в пылевидном состоянии.

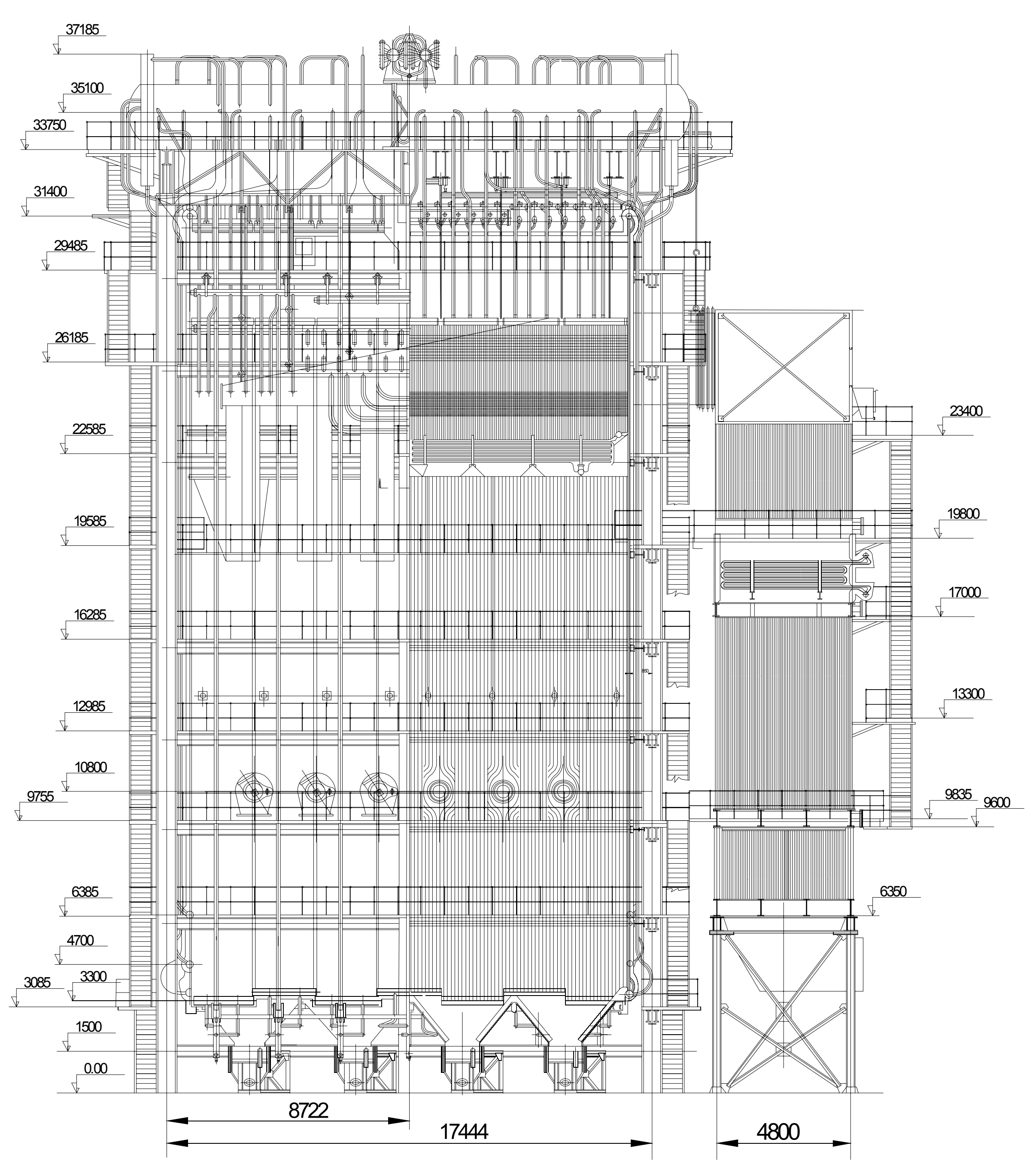


Рис. 1. *Вид с фронта и поперечный разрез котла БКЗ-420-140*

Котел – вертикально-водотрубный, однобарабанный, с естественной циркуляцией; выполнен по Т-образной сомкнутой компоновке с вынесенной конвективной шахтой (рис. 1).

Топочная камера с твердым шлакоудалением имеет габариты по высоте 27,3 м, по ширине 15,744 м и по глубине 9,024 м, полностью экранирована трубами диаметром 60 мм с толщиной стенки 5,5 мм, расположенными с шагом 64 мм. Фронтовой и тыльный экраны в нижней части образуют скаты холодной воронки, в верхней – пережим.

Вихревые лопаточно-лопаточные горелки расположены на отметке 10800 мм встречно в один ярус по 6 штук на фронтовой и тыльной стенах топки, причем крутка потока осуществляется поочередно в трех горелках с левым вращением и в трех других – с правым вращением. Диаметр горелок по внешнему каналу подачи вторичного воздуха – 1,032 м, а по внутреннему каналу подачи аэросмеси – 0,53 м. Расчетные скорости в устье горелок: первичного воздуха – 18...20 м/с, вторичного воздуха – 25,4 м/с.

Основные характеристики работы топки на экибастузском угле, которые положены в основу расчета: расход угля на котле – 70560 кг/ч; расход угля на горелку – 5880 кг/ч; тонкость помола угольной пыли по остатку на сите R_{90}=14,2 %; коэффициент избытка воздуха на выходе из топки – 1,2; температура аэросмеси – 220 °C, температура вторичного воздуха – 370 °C.

В качестве замещающих проектное топливо согласно [1] приняты угли: каменный марки Д Кузнецкого бассейна и бурый Б2 Ирша-Бородинского месторождения Канско-Ачинского бассейна. Поскольку эти угли существенно отличаются по теплотехническим свойствам от экибастузского, для них необходимо соблюдать другие условия образования и воспламенения топливно-воздушной смеси. Рассмотрены аэродинамические схемы организации факела за счет взаимодействия прямоточных струй в топочном объеме, характерные для сжигания высокореакционных углей. Принята схема, при которой достигаются наименьшие конструктивные изменения топки (рис. 2).

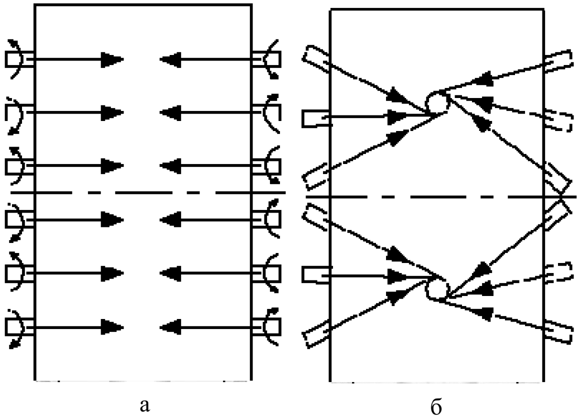


Рис. 2. *Схема размещения горелок (в плане) и направления результирующих векторов горелочных струй в топке при сжигании: а) экибастузского угля; б) замещающих углей*

При этом горелки остаются в прежних амбразурах, демонтируются их лопаточные завихрители, за счет чего они становятся прямоточными. Топочный объем делится условно по ширине на две части, в каждой из которых оси горелок ориентированы тангенциально к условной окружности в центре диаметром 1000 мм (см. рис. 2, *б*). В результате взаимодействия прямоточных струй образуется симметричная двухвихревая структура факела с противоположной закруткой вихрей.

Для определения расходных и балансовых характеристик при сжигании замещающих углей выполнены тепловые расчеты топки на номинальную нагрузку по нормативному методу [4], результаты которых использованы в качестве исходных данных и параметров сравнения при численном моделировании. Тонкость помола угольной пыли согласно нормативным рекомендациям принята: для ирша-бородинского угля – R_{90}=42 %, для кузнецкого угля – R_{90}=25 %. Соответственно, значения скоростей истечения потоков первичного и вторичного воздуха составили: в первом случае – 20 и 28 м/с, во втором случае – 20 и 42 м/с.

Исследования аэродинамики, горения и теплообмена топки проведены с применением пакета прикладных программ FIRE 3D, который позволяет проводить вариантные исследования на основе математических моделей и анализировать полученные результаты в графическом виде [5, 6]. Визуализация возможна в двух- и трехмерном вариантах, при этом можно устанавливать любые сечения по координатам X, Y и Z для отображения внутренней структуры топочной среды и выводить результаты расчетов по нескольким исследуемым процессам и одновременно получать данные по более чем тридцати параметрам.

Анализ результатов

Примеры визуализации результатов моделирования процессов в топке представлены на рис. 3–5.

Аэродинамическая структура потоков в зоне активного горения (рис. 3) показывает, что исследуемая для перехода на непроектное топливо схема компоновки горелок действительно воспроизводит два вихря, растянутых по глубине топки, с образованием обширных рециркуляционных зон вблизи ее продольной оси и боковых стен. Следствием данной аэродинамики является распределение температуры в топочном объеме, показанное для одного горизонтального и одного вертикального сечения на рис. 4.

Можно видеть существенные отличия условий при сжигании экибастузского угля по существующей компоновочной схеме горелок и при сжигании замещающих углей по исследуемой схеме, а в последнем случае – между сжиганием бурого и каменного углей.

Так, сжигание экибастузского угля при встречной компоновке вихревых горелок (рис. 4), харак-

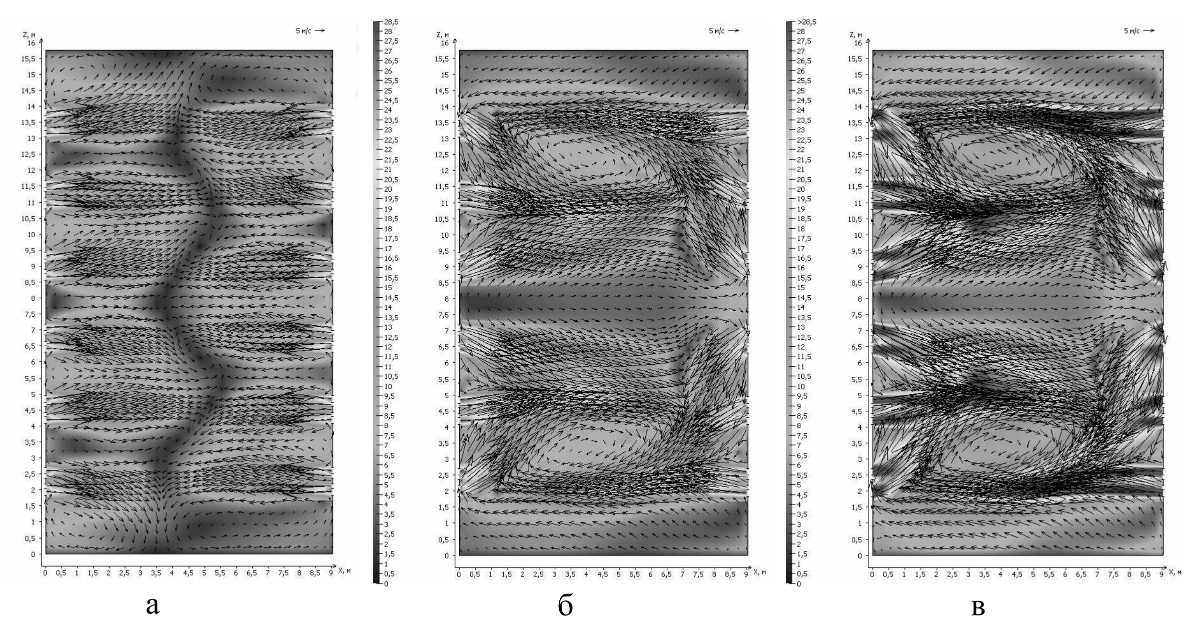


Рис. 3. *Аэродинамика топочной камеры котла БКЗ-420-140 в горизонтальном сечении на отметке 10800 мм. Уголь: а) экибастузский; б) ирша-бородинский; в) кузнецкий*

теризуется сравнительно равномерным распределением факела в горизонтальном сечении зоны активного горения. Локальные значения температуры здесь не превышают 1350 К в межгорелочных промежутках, а непосредственно в ядре горения на участках интенсивного реагирования топливно-воздушной смеси, практически на уровне оси горелок, достигают максимального значения 1770 К. Вследствие столкновительного взаимодействия двух рядов горелочных струй границы зоны горения заметно смещены в объеме топки по вертикали: вверх – до уровня середины расстояния между горелками и пережимом топки, вниз – до середины высоты холодной воронки. Однако в верхнем, выходном объеме топки температура не превышает 1350 К.

Распределение факела в топке при двухвихревой компоновке прямоточных горелок создает совершенно другую картину температурных полей (рис. 4, *б* и *в*). В горизонтальной плоскости область высоких температур вытянута в диагональных направлениях, а объем, занятый непосредственно вихрями, характеризуется довольно равномерным температурным полем, что свидетельствует о наличии условий для интенсивного перемешивания топлива с воздухом и выгорания. Однако вследствие различия теплотехнических характеристик бурого и каменного углей при одной и той же аэродинамической схеме организации сжигания имеет место разный температурный уровень и характер распространения высокотемпературной зоны как по сечению, так и по высоте топочной камеры.

Сжигание бурого угля (рис. 4, *б*) развивает в периферийной части объема зоны активного горения температуру в пределах от 1000 до 1400 К, а непосредственно в вихрях – от 1480 до 1687 К. По высоте топки ядро горения располагается с небольшим превышением уровня горелочного пояса и создает наиболее равномерную среди рассматриваемых вариантов удельную тепловую нагрузку на топочные экраны. Следствием этого является наиболее равномерное поле температур и наиболее низкие их локальные значения в верхнем, выходном объеме топки – не более 1420 К.

Подобная визуальная картина процессов горения характеризует и сжигание каменного угля (рис. 4, *в*), с той разницей, что во всех частях топки развивается более высокая температура при локальном максимуме 2000 К в области интенсивного вихревого взаимодействия. Важное отличие состоит также в том, что ядро горения имеет гораздо большие размеры и существенно смещено вверх, вследствие чего область высоких температур занимает почти все пространство над горелочным поясом и даже частично распространяется в пережим топки. Естественно, эта особенность отражается и на повышении температуры в верхнем, выходном объеме топки – здесь локальные значения достигают около 1500 К.

Моделирование взаимодействия твердой фазы топочной среды с ограждающими поверхностями топки позволило определить наиболее вероятные зоны наброса частиц на тепловоспринимающие экраны (рис. 5).

Во всех исследованных вариантах одной из характерных зон контакта твердой фазы с ограждающими поверхностями топки являются скаты холодной воронки, где формируется основная доля улавливания золы в шлак. По интенсивности наброса частиц в холодной воронке можно составить количественные оценки коэффициента шлакоулавливания и затем других составляющих золового баланса, например, запыленности уходящих дымовых газов.

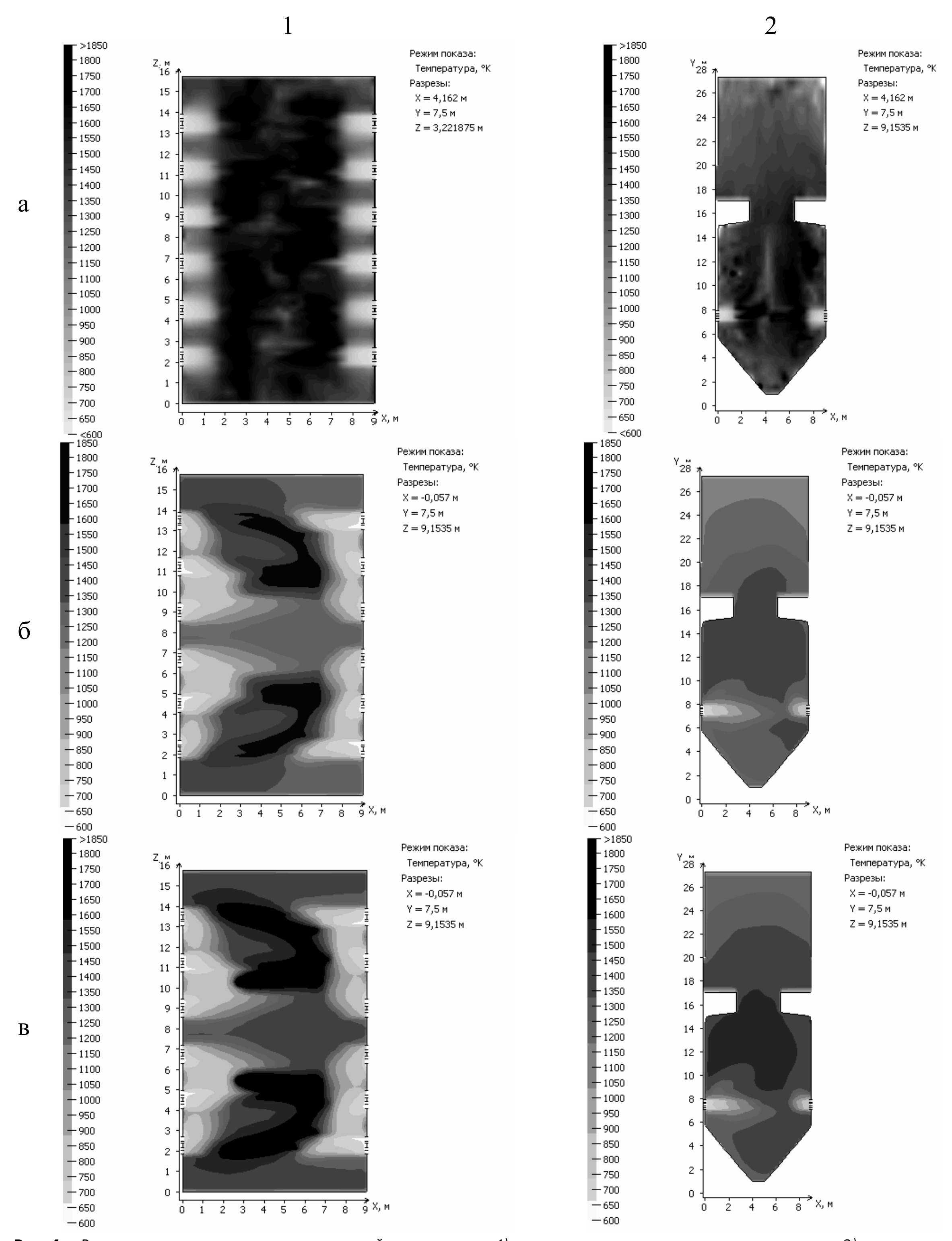


Рис. 4. *Распределение температуры в топочной камере котла: 1) в горизонтальном сечении по оси горелок; 2) в вертикальном сечении по продольной оси топки; а, б, в – соответственно угли: экибастузский, ирша-бородинский, кузнецкий*

Зоны наброса частиц, показанные на вертикальных экранах, позволяют выявлять другие особенности работы топки с учетом известных свойств неорганической составляющей углей. Так, при сжигании экибастузского угля (рис. 5, *а*) наиболее вероятными процессами являются общий абразивный износ труб настенных экранов и занос золой горизонтальных участков в области пережима. Самый интенсивный наброс частиц характерен для боковых экранов на уровне горелочного пояса, по мере увеличения высотной отметки его интенсивность убывает. Учитывая, что высокотемператур-

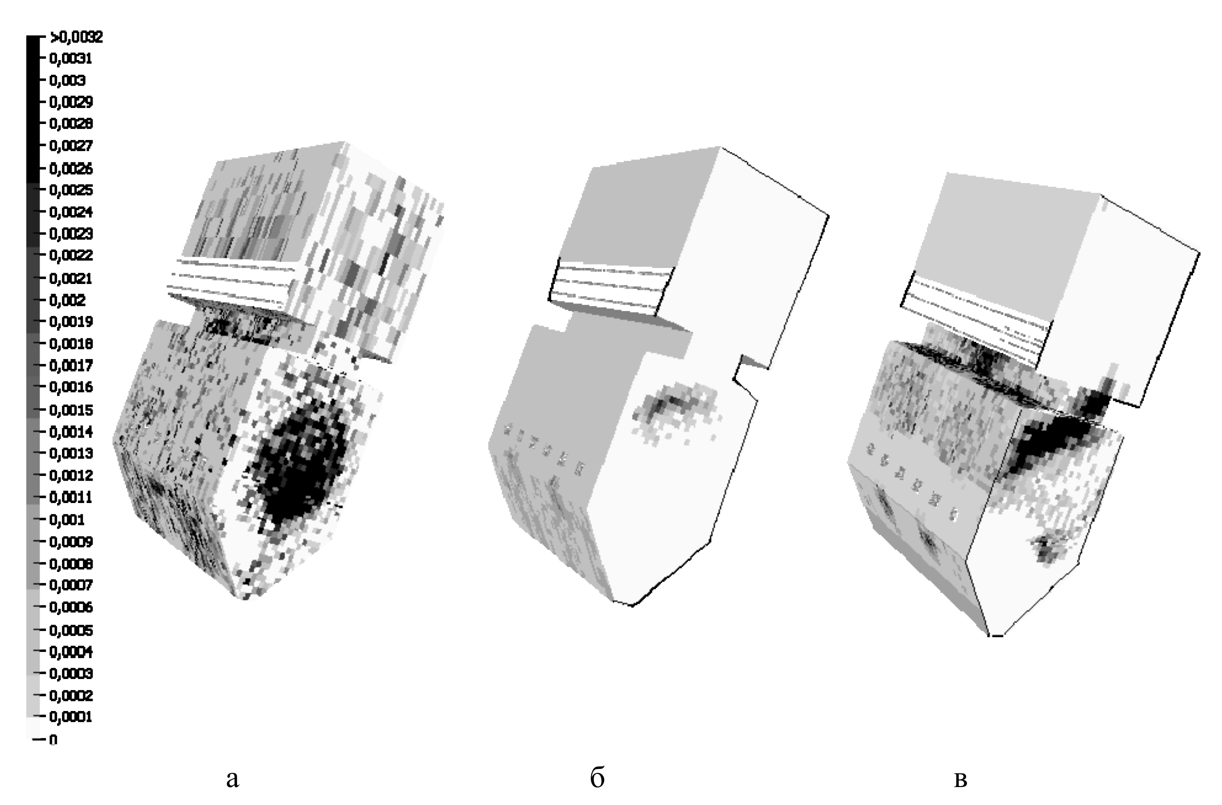


Рис. 5. *Распределение интенсивности наброса частиц на экраны топки при сжигании углей: а) экибастузского; б) ирша-бородинского; в) кузнецкого*

ная среда здесь наиболее приближена к экрану, при периодическом поступлении партий угля с повышенной примесью железосодержащих компонентов создаются условия для чередования процессов золовой эрозии и шлакования труб. Сравнительно надежная работа топки по условиям шлакования прогнозируется для варианта со сжиганием ирша-бородинского угля, моделирование которого показывает наименее выраженные очаги взаимодействия частиц с экранами, причем лишь на боковых стенах (рис. 5, *б*). Самое интенсивное шлакование экранов следует ожидать для варианта со сжиганием кузнецкого угля, поскольку моделированием установлено набрасывание частиц по всему периметру стен нижней части топки практически от горелочного пояса до пережима (рис. 5, *в*).

Усредненная по горизонтальным сечениям температура в топке показана на рис. 6 в зависимости от изменения высотной координаты сечения.

Изменение температуры в топке исследуемого котельного агрегата при сжигании экибастузского угля (кривая 1) происходит следующим образом (рис. 6). В нижней части топки, примерно на уровне середины холодной воронки, значение температуры 1100 °С. Далее с увеличением высоты топочной камеры температура в топке котла также растет и достигает максимума в 1399 °С на уровне горелок. При дальнейшем увеличении высоты топочной камеры температура плавно уменьшается и на выходе из топки имеет значение 1090 °С.

Во втором случае, при сжигании ирша-бородинского угля (кривая 2), температура на середине высоты холодной воронки имеет значение 975 °С, далее температура резко возрастает до 1000 °С на уровне оси горелок (рис. 6). При дальнейшем рассмотрении изменения температуры по высоте топки видно, что максимального значения 1135 °С температура достигает выше уровня горелок, на высоте 11,8 м. В дальнейшем температура постепенно уменьшается и на выходе из топки имеет значение 1040 °С.

Моделируя подачу в топку кузнецкого угля марки Д через те же прямоточные горелочные устройства, что и при сжигании ирша-бородинского угля, установлено, что распределение температур в топке котла имеет приблизительно тот же вид (рис. 6, кривая 3).

Температура на уровне середины холодной воронки имеет значение 1060 °С. На высоте топочной камеры, где расположены горелочные устройства, температура имеет значение около 1100 °С и равномерно возрастает по высоте топки, достигая максимума 1253 °С на уровне 11,4 м. Далее температура по высоте топки равномерно снижается и на выходе из нее имеет значение 1130 °С.

Эти данные свидетельствуют о том, что численное моделирование обеспечило приемлемую для целей предпроектного прогнозирования сходимость с расчетами по нормативной методике теплового расчета: разница температур на выходе из топки не превысила 50 °С.

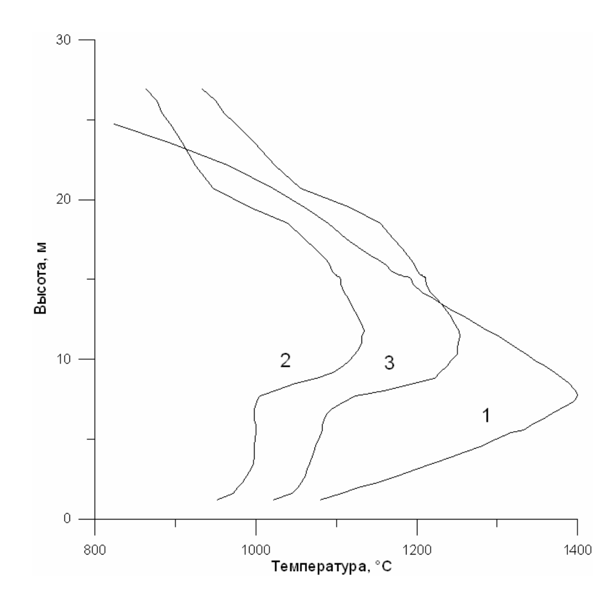


Рис. 6. *Изменение средней температуры по высоте топки при сжигании углей: 1) экибастузского; 2) ирша-бородинского; 3) кузнецкого*

Заключение

Использование оригинального пакета прикладных программ FIRE 3D позволяет получать общую картину, поля изолиний и параметры аэродинамики, горения, теплообмена, взаимодействия частиц с ограждающими поверхностями топочной камеры для различных способов организации факельного сжигания твердого топлива. Совокупность этих результатов, дополняемая их интерпретацией в трехмерной визуализации, существенно расширяет возможности для выбора варианта перевода энергетического котла на непроектное топливо по сравнению с традиционными подходами к предконструкторской проработке такой инженерной задачи.

Схема пылесжигания с одноярусным расположением прямоточных горелок в прежних амбразурах взамен вихревых и при двухвихревой компоновке, достоинством которой является наименьший объем реконструкции топки при переводе котла БКЗ-420-140 на замещающий уголь, не пригодна для сжигания кузнецкого каменного угля марки Д, т. к. не обеспечиваются условия для надежной работы поверхностей нагрева котла и минимизации токсичных выбросов. Данная схема совместима со свойствами бурого ирша-бородинского угля и создает сравнительно с другими рассмотренными вариантами благоприятные условия: по температурному уровню в зоне активного горения, что сокращает генерацию оксидов азота; по равномерности тепловой нагрузки на испарительные поверхности нагрева, что снижает вероятность теплогидравлической разверки в элементах естественной циркуляции; по температуре дымовых газов на выходе из топки, что уменьшает интенсивность образования золошлаковых отложений на конвективных поверхностях нагрева пароперегревателя; по площади прогнозируемых зон шлакования топочных экранов, что позволяет сократить количество размещаемых в топке аппаратов очистки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов А.Ф., Гаврилов Е.И. Экологические аспекты замещения экибастузского угля кузнецкими углями на ТЭС России // Теплоэнергетика. – 2004. – № 12. – С. 23–28.
2. Возможность сжигания альтернативных углей взамен экибастузского с позиций шлакования котлов / В.В. Богомолов, В.И. Мансуров, А.Н. Алехнович и др. // Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сб. докл. II научно-техн. конф. – Челябинск: Изд-во УралВТИ, 1996. – С. 4–12.
3. Опытное сжигание непроектных углей на Омской ТЭЦ-4 / С.Г. Козлов, А.А. Безденежных, С.И. Корнейчук и др. // Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сб. докл. II научно-техн. конф. – Челябинск: Изд-во УралВТИ, 1996. – С. 13–24.
4. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
5. Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А.В. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Докл. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 369–371.
6. Старченко А.В., Заворин А.С., Красильников С.В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакоулавливания в пылеугольных топках // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 152–157.

Поступила 04.07.2006 г.